

고강력 철근을 사용한 RC 보의 휨연성 평가

Assessment of Flexural Ductility in RC Beams

with High-Strength Reinforcement

권순범^{*} 윤영수^{**} 이만섭^{***} 임철현^{****}
Kwon, Soon Beom Yoon, Young Soo Lee, Man Seop Lim, Chul Hyun

ABSTRACT

Recently, structure performance is maximized by using high strength concrete. In design of structure, concrete need combination with reinforcement, but use of common strength reinforcement make member complex bar placement, so high strength concrete members require increased strength reinforcement. If common strength reinforcement replaced by equal tension area of high strength reinforcement, reinforcement ratio increase and brittle failure of member may occur by material change. So, adequate upper limit of strength ratio is required to affirm ductile behavior in application of high strength reinforcement.

In this study, ductility behavior was analysed by factor of reinforcement ratio, strength of concrete and reinforcement. The result indicate that ductile failure is shown under $0.35\rho_b$ in any reinforcement strength of same section and high strength concrete of $800\text{kg}/\text{cm}^2$ used commonly is compatible with reinforcement of $5500\text{kg}/\text{cm}^2$.

1. 서론

고강도 콘크리트의 개발 및 실용화는 기존 구조물에 비해 자중 감소에 의한 교량의 장대화, 다층 라아멘의 보나 기둥부재의 단면적 축소에 의한 이용공간의 확대등을 가능케 하여 실용적인 측면으로 상당히 유용한 전망을 가지고 있다. 그러나 이러한 고강도 콘크리트의 장점에도 불구하고 일반강도의 철근을 적용한 콘크리트의 고강도화 만으로는 철근비의 상승으로 인한 취성적 파괴, 처짐량의 증가, 밀실한 배근 구조를 띠게 되는 등 추가적인 문제점이 발생하게 되어 고강도 철근의 사용이 불가피하게 된다. 한편 고강력 철근의 적용시 예상되는 문제점으로는 구조적 처짐량으로 설계가 결정되는 부재에서는 배근량 절감이 제한적으로 적용될 뿐만 아니라, 재료적인 측면에서도 재료의 고강도화로 인한 부재 전체의 인성이 줄어드는 부적합 등이 있다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 사용되고 있는 일반강도 콘크리트와 고강도 콘크리트, 국내에서 생산한 일반강도 철근과 고강력 철근을 사용하여 휨 실험을 실시한 후 그에 따른 역학적 특성과 구조적 성능을 검토하여 구조물 시공에 적합한 철근강도와 콘크리트 강도를 산정한다.

* 정회원, (주)서영기술단 구조부 사원
** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수
*** 정회원, 브이에스엘 코리아(주) 전무
**** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 석사과정

2. 실험

2.1 사용 재료

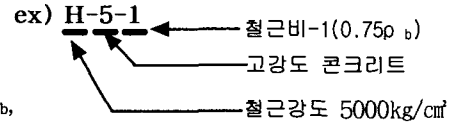
설계압축강도 250kg/cm² 과 400kg/cm²의 콘크리트를 사용하였고 28일간 양생된 공시체는 스트레인게이지를 부착하여 응력-변형도 곡선을 측정하였다. 철근은 현재 국내에서 생산되는 공칭 직경이 16, 19, 22, 25, 29mm 인 이형 철근으로 항복강도가 3000kg/cm², 5000kg/cm²인 것을 사용하였다.

2.2 실험 변수

각각의 콘크리트 및 철근 강도조합에 따른 철근비를 0.75 ρ_b, 0.45 ρ_b, 0.35 ρ_b로 9개의 시험체를 제작하였으며 실험체의 명명은 그림 1과 같다.

2.3 실험체 제작

보 부재의 span/depth ratio가 약 6.0보다 큰 6.2로 설정하여 전형적인 휨과 파괴를 유도하였다. 길이는 3000mm, 폭 220mm, 높이 250mm 크기의 시험체에 전단파괴를 방지하기 위하여 80mm의 간격으로 8개, 140mm의 간격으로 4개의 전단철근을 그림과 같이 배근하였다. 순수 휨 구간은 단철근 배근하였다.



- M : 250kg/cm² 일반강도 콘크리트
- H : 400kg/cm² 고강도 콘크리트
- 3 : 3000kg/cm² 일반강도 철근
- 5 : 5000kg/cm² 고강도 철근
- 1 : 철근비 0.75 ρ_b
- 2 : 철근비 0.45 ρ_b
- 3 : 철근비 0.35 ρ_b

2.4 실험 방법

순수 휨구간을 만들기 위해 2점재하를 실시하였으며 지점은 단순지점으로 구성하였다. 처짐량은 보의 중앙부분에 설치된 LVDT로 측정되어지며 data logger를 통해 기록된다. 철근의 변형률 측정을 위해 스트레인게이지를 철근면에 부착하였고 U-cam에 연결하여 인장철근의 이력을 기록하였다. 콘크리트의 상부면을 grinding을 실시하고 스트레인게이지를 부착하여 콘크리트 응력을 계측하였다. 최초 인장균열의 하중, 철근항복시의 하중 및 처짐량, 파괴시의 하중 및 처짐량이며 철근항복시의 처짐량과 파괴시의 처짐량을 측정하였다.

그림 1 시험체 명명

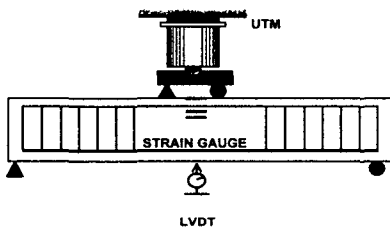


그림 2 실험체와 UTM

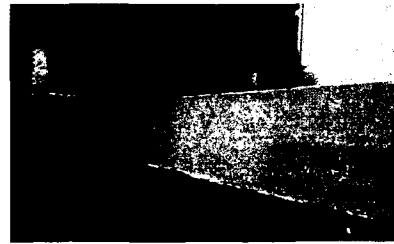


그림 3 실제 실험 사진

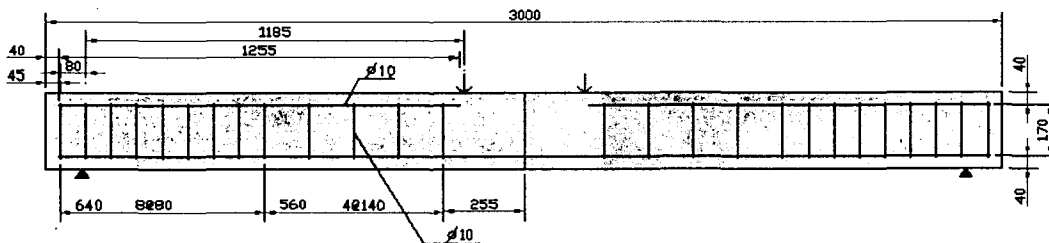


그림 4 실험체의 배근상세

3. 실험결과 및 분석

3.1 하중-변위 관계

그림 5~7은 각 series의 하중 변위곡선을 나타내고 있다. 전체적인 파괴양상은 전형적인 휨 파괴로 나타나고 있으며, 일반적인 부재의 하중 변위 관계는 최초 하중 재하부터 초기 인장균열까지 비교적 높은 강성으로 변위가 진전된 후 균열의 발생이후 균열 단면에 대한 강성의 기울기로 철근항복까지 지속적으로 변위와 힘이 증가하고 있다. 항복지점의 결정은 최초 항복점을 측정하기 위해 각각의 휨 철근에 부착한 스트레인게이지의 측정치로부터 하나의 철근만이 항복을 하여도 부재 전체적인 거동에서는 하중-곡선의 기울기가 변화하면서 항복점의 거동을 보이는 것으로 나타나 스트레인 게이지의 측정치를 이용하여 항복지점을 설정하였다. 인장 이후 파괴까지의 거동은 평형철근비 영역에 가까운 부재($0.75\rho_b$)는 미처 일정한 변위가 나타나기 전에 취성적인 파괴를 보였고 낮은 영역의 철근비($0.35\rho_b$)에서는 큰 변위를 나타내어 철근비의 영향을 명확히 나타내고 있다. 전체적인 부재의 최초 균열하중은 2.5ton~3ton사이로 거의 균일하게 측정되고 있으며, 파괴하중은 예측치와 거의 유사하게 일치하는 것으로 나타났다. 동일한 콘크리트강도와 동일한 철근강도를 가진 공시체 series에서는 철근비의 증가에 의한 뚜렷한 파괴하중의 상승을 보여주고 있다.

표 1 배근상세

Concrete	Steel	Type	Area	Reinforcement ratio/ ρ_b
250	3000	2D-29	12.848	0.765
		2D-22	7.742	0.461
		2D-19	5.73	0.341
400	3000	2D-25 +2D-22	17.876	0.650
		2D-25 +D-19	12.848	0.467
		2D-22 +D-19	10.607	0.386
400	5000	2D-25	10.134	0.750
		3D-16	5.958	0.443
		2D-16	3.972	0.295

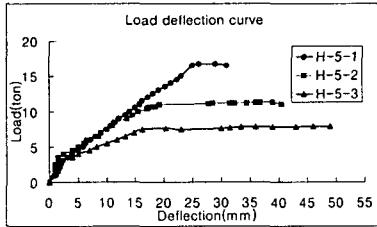


그림 5 하중 변위곡선(H-5 series)

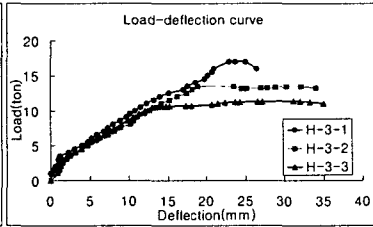


그림 6 하중 변위곡선(H-3 series)

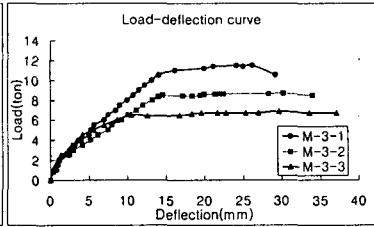


그림 7 하중 변위곡선(M-3 series)

3.2 철근비에 따른 부재의 연성 거동

표 2는 각 변수별 연성지수 산정을 위한 주요 데이터를 나타낸다. 연성지수산정을 위해서는 파괴시의 처짐과 항복시의 처짐을 결정하여야 하는데, 본 연구에서는 인장철근의 스트레인게이지를 이용하여 최초 인장철근이 항복에 도달하였을 때를 항복점으로 설정하였고, 휨 내력이 급격히 하강하는 지점을 파괴점으로 설정하여 처짐을 결정하였다. 연성지수는 파괴시의 처짐/항복시의 처짐으로부터 산정하여 이렇게 얻어진 연성지수는 그림 8에 보여진다. 연성지수는 기존의 연구와 비교하면 대체적으로 철근비의 영향을 적절하게 반영하고 있는 것으로 판단된다.

일반적으로 구조물의 연성파괴를 유도하기 위한 연성의 정도를 연성지수를 사용하여 분류한다. 철근 콘크리트 구조물의 연성지수는 극히 취성거동 구조물인 경우의 1에서부터 연성거동 구조물 7인경우로 분류하게 되는데 대체적으로 3~6정도의 연성지수가 요구되고 있으며 극심한 지진지역이 아닌 보통의 구조물의 경우 3정도의 연성이 요구되고 있다. 기존의 연구와 본 실험의 결과를 비교하여 볼 때 연성지수의 관점에서는 일반적인 구조물의 경우, 3정도의 연성거동을 보이고 있는 $0.35\rho_b$ 의 철근비가 적절한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 연성지수에 의한 분류는 항

복이후 파괴시까지의 변위가 충분하여 붕괴의 징후를 나타낼 수 있는 부재임에도 불구하고 항복까지의 변위 증가에 기인하여 낮은 연성지수를 나타내는 경우가 발생하게 되어 실제구조물에 연성지수 적용에 적절한 고려가 이루어져야 하겠다.

표 2 연성지수의 산정

Specimen	ρ / ρ_b	As	Δ_y	Δ_t	μ_y
H-5-1	0.750	10.134	25.0	29.0	1.16
H-5-2	0.443	5.958	19.2	39.0	2.03
H-5-3	0.295	3.972	16.2	49.0	3.02
H-3-1	0.650	17.876	21.0	25.0	1.19
H-3-2	0.467	12.848	18.9	32.2	1.70
H-3-3	0.373	10.607	10.5	31.2	2.97
M-3-1	0.765	12.848	20.0	26.2	1.31
M-3-2	0.461	7.742	14.6	30.2	2.07
M-3-3	0.341	5.730	7.5	21.3	2.84

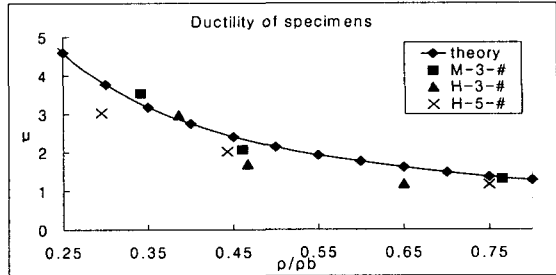


그림 8 연성지수 그래프

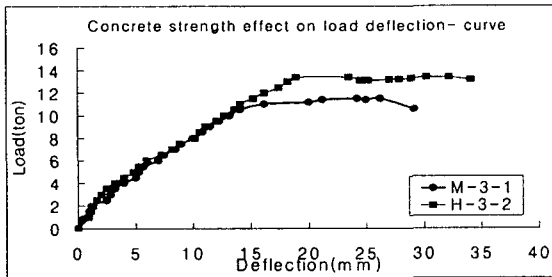


그림 9 하중-변위에 대한 콘크리트 강도효과

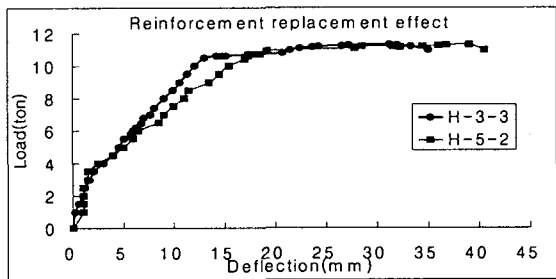


그림 10 하중-변위에 대한 철근 강도효과

3.3 콘크리트 강도변화에 따른 부재의 거동

그림 9는 H-3-2, M-3-1의 동일한 철근 단면적, 동일한 철근 강도시험체의 비교를 나타내었다. 콘크리트 강도의 변화로부터 휨 내력이 상승하는 것을 나타내고 있고 연성지수 또한 다소 상승하는 것을 확인할 수 있고 기존의 연구와 부합되는 결과를 나타낸다. 휨 부재의 파괴는 최초 인장력과 동일한 콘크리트 응력블럭 생성으로 평형상태에 도달한 후 항복된 인장철근의 변위가 증가하면서 응력블럭의 면적이 감소하게 된다. 응력블럭의 감소는 과도한 stress를 유발하여 인장력에 상응하는 압축력을 받지 못하여 종국에 파괴에 이르게된다. 휨 부재에 고강도 콘크리트를 적용하면 위에서 언급한 파괴이후의 응력블럭이 상대적으로 작은 면적으로도 인장력에 상응하는 압축력을 확보할 수 있게되고 일반강도 콘크리트보다 인장철근의 큰 변형을 유도하게 되어 연성지수의 증가를 가져온 것으로 판단된다.

3.4 고장력 철근 치환효과

그림 10의 그래프는 동일한 콘크리트-동일한 강성의 철근면적(H-5-2, H-3-2)을 가진 부재의 상호 비교이다. 위의 그래프는 고장력 철근으로 일반장력을 치환한 대표적인 경우인데 연성지수면에서는 다소 감소하였으나 휨 내력에는 그다지 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 또한 고장력 철근을 사용하였을 경우 상대적으로 항복시의 변위량이 증가하였고 파괴시에도 다소 감소된 처짐을 보이나 항복이후의 거동에서는 두 공시체가 유사한 거동을 보임으로써 이러한 철근의 치환은 항복시까지의 변위에 주요한 영향을 미치며 결국 연성지수도 항복시까지의 변위량이 증가함으로써 감소한 것으로 판단된다. 따라서 안정적 인 부재의 설계를 인장철근의 항복이후의 충분한 변위를 확보하는 것이라는 측면에서는 고장력 철근의 적용이 가능하다고 판단된다.

4. 철근 및 콘크리트 강도 효과 고찰

부재의 연성이란 어떠한 부재가 외력을 받았을 때 어느 정도의 변형이 일어난 후에 파괴에 이르는가를 판단하는 부재의 변형성능을 나타내는 용어로서, 부재파괴시 붕괴의 위험성을 인지시키는 데에 기준이 되는 값으로 사용되고 있다. 연성의 주요한 거동은 철근비의 영향으로부터 유도되고 있는데 철근 콘크리트 구조물에 거동변화는 콘크리트의 강도변화에 따른 응력블럭의 변화와 이에 상응하는 인장철근의 거동이 주로 지배하게 된다. 휨 구조물의 연성에 가장 큰 영향을 주는 최대철근비를 산정식은 다음과 같이 유도된다.

$$C = 0.85f_{ck}ab \quad (1)$$

$$T = f_y A_s \quad (2)$$

$$c = \frac{0.003d}{f_y + 0.003} \left(0.85 - \frac{0.007(f_y - 280)}{10} \right) \quad (3)$$

$$\rho_b = \frac{0.85f_{ck}C}{f_y} = AB \frac{f_{ck}}{f_y(f_y + 6000)} \quad (4)$$

$$\text{where } A=5334.6, \quad B=(1-0.00067f_{ck})$$

평형철근비는 철근항복시의 콘크리트가 붕괴되는 시점의 응력블럭의 상태로부터 유도하게 된다. 식 (3)으로부터 평형상태의 응력블럭을 산정하게 되고 식 (1)과 (2)를 사용하여 평형철근비의 식 (4)를 얻게 된다. 여기서 A값은 일반적인 상수로 표현되고 B는 콘크리트 강도에 따른 응력블럭을 보정해주는 식으로 사용하게 된다. 일반적으로 B값은 콘크리트의 강도 280kg/cm²이하에서는 0.813부터 콘크리트 강도 560kg/cm²까지는 선형적으로 변화하고 그이상의 강도에 대해서는 0.621값을 보유하게 된다. 평형철근비에 관한 식 (4)에서 콘크리트의 강도를 250kg/cm²에서 700kg/cm²로 증가시켰을 경우 평형철근비가 2.14배 증가하는 것으로 나타나 동일한 단면의 경우 ρ/ρ_b 의 값을 감소시켜 연성의 증대를 가져오는 것으로 나타난다. 한편 철근의 강도를 3000kg/cm²에서 6000kg/cm²를 증가시켰을 경우 철근비는 0.375배로 감소하는 것으로 나타나 콘크리트의 경우와는 반대로 ρ/ρ_b 의 값을 증가시키는 경향이 있는 것으로 나타났다. 따라서 일반적으로 철근콘크리트 부재에 있어서는 철근의 강도변화가 콘크리트의 강도변화보다 평형철근비를 변화시키는 주요 인자로서 나타나고 있다.

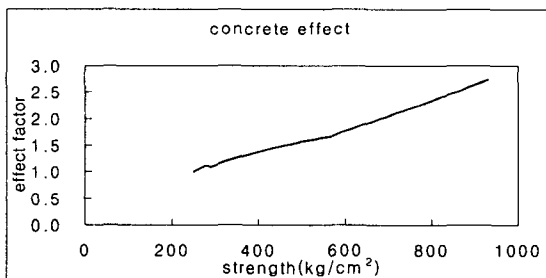


그림 11 연성도에 대한 콘크리트 강도의 영향

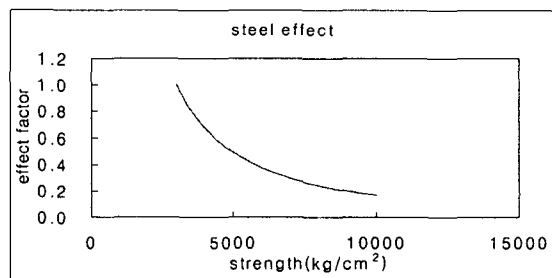


그림 12 연성도에 대한 철근강도의 영향

그림 11과 그림 12는 콘크리트 및 철근강도의 변화에 따른 최대철근비에 미치는 영향을 고려한 그래프이다. 위의 그래프에서는 철근 및 콘크리트의 강도의 변화에 따른 효과를 무차원으로 나타내고 있다. 콘크리트는 250kg/cm²를 기준으로 하여 900kg/cm²까지의 강도변화를 고려하였고 철근은 3000kg/cm²를 기준으로 하여 10,000kg/cm²까지의 강

도변화에 대한 고려를 실시하였다. 기존의 철근 콘크리트구조물을 기준으로 평형철근비 면적의 감소 없이 휨 내력을 상승시키면서 고장력 철근을 적용하기 위한 콘크리트 강도를 산정하여 보면 그림으로부터 현재 현장에서 주로 사용되고 있는 초고강도 콘크리트의 강도가 800kg/cm²인점을 감안하면 그림 11로부터 effect factor는 2.37로써 그림 12로부터 적절한 철근비는 effect factor가 0.416인 5500kg/cm²의 철근강도가 적절한 것으로 나타나고 있다. 따라서 일반적으로 철근 콘크리트 구조물에 연성거동을 고려한 고장력 철근을 활용하기 위해서는 적절한 고강도 콘크리트가 요구되는 것으로 나타나고 있다.

5. 결 론

일반적으로 동일한 콘크리트와 철근강도일 경우 철근비가 상승할수록 취성적인 파괴양상을 띠며 각각의 변수에서 0.35 ρ_b 일 경우에는 연성지수 3이상의 거동을 할 수 있는 것으로 나타났다. 휨 부재에 있어서 하중-변위곡선에 영향을 미치는 가장 주요한 인자는 콘크리트의 강도와 철근의 강도이고 고장력 철근을 사용하였을 경우 항복시의 처짐이 증가되고, 파괴까지의 변위는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 정적 구조물일 경우, 또는 사하중이 지배하는 경우 고장력 철근의 적용이 적합할 것으로 판단된다. 고장력 철근을 사용한 부재는 일정한 변위를 겪은 이후에도 잔류 휨 내력이 상대적으로 크게 나타난다. 따라서 이러한 특성을 이용하여 온도응력이 지배되는 구조물에는 고장력 철근의 사용이 적절할 것으로 판단된다. 고장력 철근을 사용하여 휨 부재의 내력을 증가시킬 경우 연성의 감소가 발생하나 고강도 콘크리트와 적절하게 조합하여 사용한다면, 기존의 연성의 손실 없이 부재의 휨 내력을 증가시킬 수 있는 것으로 나타났고, 일반적인 고강도 콘크리트 800kg/cm²의 강도에는 5500kg/cm²의 철근강도가 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정 연구실(NRL)과 기초전력공학 공동연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다. 또한 실험부재 제작 시 많은 도움을 주신 인천체철(주) 관계자 및 VSL KOREA(주) 신단양대교 현장 직원께도 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

- 1) 강석화, "고강도 철근이 배근된 고강도 콘크리트 부재의 휨거동에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제 15권 1호, 1995, pp.107-117
- 2) 김진근, 박찬규, "주철근비에 따른 고강도 콘크리트보의 휨 거동", 1994년도 콘크리트학회 춘계학술강연회, 1994
- 3) Shin, S.W., Ghosh, S.K. and Moreno, J. "Flexural Ductility of Ultra-High Strength Concrete Members", ACI Structural Journal, Vol.86, No. 4, 1989, pp.394-400
- 4) Park, Robert, and Paulay, Thomas, Reinforced Concrete Structure, John Wiley & Sons, New York, 1975, 769 pp.
- 5) ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institut, pp.14-9.